

ЭППТ 2018



ACED 2018

УДК 621.313.3

НОВЫЕ РАЗРАБОТКИ ПАО «НИПТИЭМ» ДЛЯ ЭЛЕКТРОТРАНСПОРТА: ТЯГОВЫЕ АСИНХРОННЫЕ ДВИГАТЕЛИ ПРИВОДА ДВИЖЕНИЯ ТРОЛЛЕЙБУСА

NEW DEVELOPMENTS OF PJSC «NIPTIEM» FOR ELECTRIC VEHICLES: TRACTION INDUCTION MOTORS FOR TROLLEYBUS MOTION

Галдин Алексей Юрьевич, нач. лаборатории электрических испытаний, Россия, 600009, г. Владимир, ул. Электrozаводская, д.1. E-mail: a.galdin@ruselprom.ru. Тел.: +7960921234

Кобелев Андрей Степанович, кн. техн. наук, начальник расчетно-теоретического сектора ПАО «НИПТИЭМ», Россия, 600009, г. Владимир, ул. Электrozаводская, д.1 E-mail: a.kobelev@ruselprom.ru. Тел.: +79107717903

Макаров Лев Николаевич, д-р. техн. наук, генеральный конструктор концерна «РУСЭЛПРОМ», Россия, 109029, г. Москва, ул. Нижегородская, д. 32, строение 15. E-mail: makarov@ruselprom.ru. Тел.: +7(495) 600-42-53

Alexey Yur. Galdin, Engineer, Public joint-stock company «NIPTIEM», 600009, Electrozavodskaya street, 1, Vladimir, Russia, E-mail: a.galdin@ruselprom.ru, Ph.: +7960921234

Andrey S. Kobelev, Cand. Sc., Public joint-stock company «NIPTIEM», 600009, Electrozavodskaya street, 1, Vladimir, Russia. E-mail: a.kobelev@ruselprom.ru, Ph.: +79107717903

Lev N. Makarov, Doctor Sc., RUSELPROM Group, 109029, Nizhegorodskaya street 32, building 15, Moscow, Russia. E-mail: makarov@ruselprom.ru. Ph.: +7(495) 600-42-53

Аннотация: Выполнен сопоставительный анализ электромеханических характеристик пяти вариантов тяговых асинхронных двигателей для привода движения троллейбуса с различным объемом активных частей, материала клетки ротора, конфигурации зубцово-пазовой зоны сердечников. Технический уровень определен без учета и с учетом превышения температуры обмотки статора при работе в ездовом цикле. Дополнительно представлены показатели разработанного тягового двигателя троллейбуса повышенной грузоподъемности.

Abstract: The comparative analysis of the electromechanical characteristics of the five variants of traction induction motors for driving a trolleybus with different volume of active parts, the material of the rotor cage, the configuration of the tooth-slot core zone is performed. The technical level is determined without taking into account and taking into account the temperature rise of the stator winding during operation in the driving cycle. In addition, the characteristics of the developed traction motor of a trolley bus of increased payload capacity are presented.

Ключевые слова: городской электротранспорт; асинхронные машины; тяговые двигатели; проектирование.

Key words: city electric transport; induction machines; traction motors; design.

ВВЕДЕНИЕ

Повышение требований к экологизации городского транспорта [1] актуализирует научно-технические задачи по дальнейшему развитию электротранспорта, и, прежде всего, трамваев и троллейбусов.

Обобщая требования к грузоподъемности, конструктивному исполнению и условиям работы различных типов троллейбусов, в самом общем виде выделить три кластера этих транспортных средств:

1) Габаритная длина около 12 м, полная масса снаряженного средства около 18 т, вместимость

около 110 чел., городской рельеф – стандартный. Примеры: *ТролЗа-5275.03 «Оптима»* (полунизкопольный), *ТролЗа-5275.07 «Оптима»* (высокопольный) [2].

2) Габаритная длина около 18 м, полная масса снаряженного средства около 25 т, вместимость около 160 чел., городской рельеф – стандартный. Пример: *ТролЗа-62052.03* (сочлененный).

3) Троллейбус, отличающийся от первого либо второго кластера повышенным максимально преодолеваемым подъемом и повышенными требованиями к разгону.

Настоящая публикация знакомит читателя с линейкой асинхронных двигателей для троллейбуса, разработанных в ПАО «НИПТИЭМ» для групп 1) и 2).

I. ВАРИАНТЫ ИСПОЛНЕНИЯ И ТЕХНИЧЕСКИЕ ПАРАМЕТРЫ ДВИГАТЕЛЕЙ

Выполненные авторами совмещенные тяговые и электромагнитные расчеты показывают:

- для кластера 1) требуется разработать двигатель с $P_n = 120$ кВт (S2 – 1 час), в квазиноминальной точке $N_{ch} = 1500$ об/мин, при обеспечении указанной мощности в конце второй зоны регулирования $N_{Ile} = 4000$ об/мин.
- для кластера 2) требуется разработать двигатель с $P_n = 180$ кВт (S2 – 1 час); далее – аналогично кластеру 1).

Кроме того, в режиме ездового цикла, рис. 1, превышение температуры обмотки статора $\Theta_{cu_ц}$, табл. 1, должно соответствовать классу выбранной изоляции.

До настоящего времени ПАО «НИПТИЭМ» около 10 лет успешно выпускал асинхронный двигатель привода движения троллейбуса AT250L4 мощностью $P_n = 120$ кВт (вариант 1). В двигателе использовалась геометрия листов статора серийной машины предыдущей серии 5AM250M4, оригинальная геометрия листов ротора; длина с сердечников увеличена с $L_s = 260$ мм до $L_s = 350$ мм, поз. 1 – расчет; поз. 2 – эксперимент, табл. 1.

Повышение технико-экономического уровня нового двигателя может быть осуществлено при решении одной или нескольких задач следующей группы: снизить превышение температуры обмотки статора; повысить энергоэффективность двигателя; уменьшить материалоемкость активных частей; уменьшить себестоимость активных частей.

Для решения этих задач представляются интересными следующие варианты исполнений: 2. Вариант с использованием полностью серийной геометрии листов 5AM250M4, включая ротор с двойной клеткой, но с удлиненной геометрией сердечников $L_s = 350$ мм, поз. 3 – расчет, поз. 4 – эксперимент. Данный вариант интересен в методическом плане, для выявления качества, приносимого пазом ротора, разработанного в предыдущей серии для применения в частотно-регулируемом приводе.

3. Вариант с использованием новой геометрии листов сердечника статора, унифицированной с типоразмерами 7AVER250, $2p = 4$; но так же с $L_s = 350$ мм. Геометрия ротора – оригинальная (простая клетка с трапециевидным верхом), эффективная при частотном регулировании

скорости; гармонизированная по индукции в зубце $B_z R$ с индукцией в зубце статора $B_z S$, поз. 5 – расчет, поз. 6 – эксперимент. Обратим внимание, что данный улучшенный вариант получен только за счет оптимизации зубцово-пазовой зоны.

4. Вариант, отличающийся от предыдущего тем, что длины сердечников соответствуют длинам сердечников серийной машины 7AVER250M4ie1, $L_s = 260$ мм, поз. 7 – расчет.

5. Вариант, отличающийся от предыдущего тем, что клетка ротора выполнена медной сварной, поз. 8 – расчет. Во всех вариантах сердечники выполнены из динамной стали 2212.

Анализ показывает, что двигатель ATs250L4 на серийной геометрии листов, в принципе, работоспособен, но имеет меньший максимальный момент M_m и меньший КПД. Интересным фактом является примерно одинаковое с AT250L4, поз. 1, превышение температуры обмотки статора, несмотря на различие в энергоэффективности, что связано с разными значениями коэффициентов греющих потерь для P_s , P_R , P_{Fe} [3].

II. ВЫБОР ОПТИМАЛЬНОГО ВАРИАНТА И РАСЧЕТ ТЕХНИЧЕСКОГО УРОВНЯ

Отберем следующие критерии оценки вариантов:

- КПД в квазиноминальной точке тяговой характеристики η_H [4];
- масса G_{act} активных частей ТАЭД;
- объем активных частей $V_{act} = D_{as}^2 \cdot L_s$;
- себестоимость активных частей C_{act} , в которой, в частности, учтено различие цены на разные системы изоляции;
- ток статора квазиноминальной точке тяговой характеристики I_H ;
- кратность максимального момента в конце второй зоны регулирования K_{max_Ile} ;
- превышение температуры обмотки статора Θ_{cu} . В отличие от [4] здесь показатель «превышение температуры» включен в свертку критериев, поскольку мы, для описываемых задач синтезируем не идеальную машину с фиксированным Θ_{cu} , а определяем этот показатель по факту проектирования.

Скаляризация критериев приводит к следующей агрегированной целевой функции оптимизации:

$$F_{\rightarrow \max}(\mathbf{X}) = \alpha_{\eta} \frac{\eta_{H_i}}{\eta_{H_b}} + \alpha_{G_{act}} \frac{G_{act_b}}{G_{act_i}} + \alpha_{V_{act}} \frac{V_{act_b}}{V_{act_i}} + \alpha_{C_{act}} \frac{C_{act_b}}{C_{act_i}} + \alpha_{I_H} \frac{I_{H_b}}{I_{H_i}} + \alpha_{K_{max_Ile}} \frac{K_{max_Ile_i}}{K_{max_Ile_b}} + \alpha_{\Theta_{cu}} \frac{\Theta_{cu_b}}{\Theta_{cu_i}}$$

Таблица 1.

Основные показатели разработанных двигателей

| № поз. | Вар. | Типоразмер | P_n , кВт | Мат. рог. | L_s , мм | V_{act} , дм ³ | G_{act} , кг | C_{act} , О.е. | КПД, % | $\cos\varphi$ | I_n , А | $K_{max, ch}$ | $K_{max, He}$ |
|--------|------|-------------------|-------------|-----------|------------|-----------------------------|----------------|------------------|--------|---------------|-----------|---------------|---------------|
| 1. | 1. | AT250L4, расч. | 120 | Al | 350 | 66,8 | 341 | 112,5 | 93,9 | 0,925 | 200 | 4,2 | 1,62 |
| 2. | | AT250L4, эксп. | 120 | Al | 350 | | | | 94,1 | 0,921 | 200 | 4,0 | |
| 3. | 2. | ATs250L4, расч. | 120 | Al | 350 | 66,8 | 330 | 112,9 | 93,0 | 0,781 | 239 | 3,6 | 1,35 |
| 4. | | ATs250L4, эксп. | 120 | Al | 350 | | | | 93,2 | 0,774 | 240 | 3,4 | |
| 5. | 3. | 7AT250L4, расч. | 120 | Al | 350 | 66,8 | 344 | 114,8 | 94,3 | 0,93 | 199 | 4,6 | 1,79 |
| 6. | | 7AT250L4, эксп. | 120 | Al | 350 | | | | 94,1 | 0,922 | 200 | 4,4 | |
| 7. | 4. | 7.4AT250L4, расч. | 120 | Al | 260 | 49,7 | 263 | 93,8 | 93,1 | 0,913 | 205 | 3,6 | 1,43 |
| 8. | 5. | 7.5AT250L4, расч. | 120 | Cu | 260 | 49,7 | 298 | 138,4 | 93,8 | 0,910 | 204 | 3,8 | 1,44 |
| 9. | 6. | 7AT250LB4, расч. | 180 | Cu | 350 | 66,8 | 385 | | 94,2 | 0,91 | 306 | 3,8 | |
| 10. | | 7AT250LB4, эксп. | 180 | Cu | 350 | | | | 94,0 | 0,91 | 303 | 3,9 | |
| 11. | 7. | ПЭМЗ: ДТА-2У1 | 180 | Cu | | | | | 93,0 | 0,9 | | ≥3,2 | |

Таблица 2.

Потери, превышение температуры и технико-экономический уровень разработанных двигателей

| № поз. | Типоразмер | I_0 , А | B_{zs} , Тл | B_{js} , Тл | P_s , Вт | P_R , Вт | P_{Fe} , Вт | Θ_{Cu_Ch} , °C | $\Theta_{Cu_Ц}$, °C | $\Sigma_{бал}$ | $T_{ур}$ |
|--------|-------------------|-----------|---------------|---------------|------------|------------|---------------|------------------------|-----------------------|----------------|----------|
| 1. | AT250L4, расч. | 59,0 | 1,78 | 1,57 | 2893 | 1557 | 2192 | 118 | | 0,592 | 1,00 |
| 2. | AT250L4, эксп. | | | | 2627 | 1346 | 2584 | 114 | 159,1 | | |
| 3. | ATs250L4, расч. | 128 | 1,96 | 1,76 | 3182 | 935 | 3547 | 116 | | 0,471 | 0,812 |
| 4. | ATs250L4, эксп. | | | | 3439 | 919 | 3238 | 115 | 162,6 | | |
| 5. | 7AT250L4, расч. | 58,6 | 1,71 | 1,52 | 2544 | 1428 | 2018 | 91,8 | | 0,669 | 1,129 |
| 6. | 7AT250L4, эксп. | | | | 2631 | 1396 | 2008 | 92,8 | 140,5 | | |
| 7. | 7.4AT250L4, расч. | 68,2 | 1,85 | 1,63 | 3842 | 1927 | 1831 | 139 | | 0,607 | 1,085 |
| 8. | 7A.5T250L4, расч. | 68,2 | 1,85 | 1,64 | 3433 | 1298 | 1831 | 93,6 | | 0,602 | 1,102 |
| 9. | 7AT250LB4, расч. | 102 | 1,89 | 1,67 | 5027 | 1980 | 2436 | 121 | | | |
| 10. | 7AT250LB4, эксп. | | | | 4932 | 2106 | 2454 | 116 | 144,0 | | |

Очевидно, у ЛПР могут быть различные «взгляды» на конечные цели оптимизации. В зависимости от таковых определяются коэффициенты значимости критериев. В настоящей работе применен «сбалансированный подход», с усилением значимости для показателей «КПД» и «себестоимость активных частей», для которых $\alpha = 0,2$. Для остальных показателей $\alpha = 0,12$.

Для соизмеримости критериев установим шкалы их допустимых значений.

а) Шкала КПД: $(IE1 + 20\% \Delta P_{IE1}) \div IE4$. Значение КПД в соответствии с классом энергоэффективности берется для ближайшей стандартной мощности общепромышленного ($P_n = 110$ кВт, $N_0 = 1500$ об/мин) по IEC 60034-

30-1. Базовым среди вариантов 1÷11 принят двигатель AT250L4 поз. 1, «BASE».

б) Шкала G_{act} : $(1,3 G_{act_BASE}) \div (0,6 G_{act_BASE})$.

в) Шкала V_{act} : $(1,3 V_{act_BASE}) \div (0,6 V_{act_BASE})$.

г) Шкала C_{act} : $(1,7 C_{act_BASE}) \div (0,7 C_{act_BASE})$.

д) Шкала I_H : $(1,5 I_H_BASE) \div (0,92 I_H_BASE)$.

Минимальное значение I_H определяется из предельных энергетических возможностей двигателя, включая СДПМ; максимальное значение – при использовании предельно насыщенной короткой машины.

е) Шкала K_{max_He} : $(1,8 M_n) \div (1,15 M_n)$.

ж) Шкала Θ_{cu} : $80^\circ\text{C} \div 180^\circ\text{C}$, т.е. между превышением температуры по классу нагревостойкости изоляции В, ГОСТ IEC 60034-1-2014 и превышением по классу Н, ГОСТ 2582–2013.

В таблице 2 показатель $T_{ур}$ идентичен целевой функции $F_{\rightarrow \max}(\mathbf{X})$ с учетом введенных шкал; показатель $\Sigma_{бал}$ показывает в о.е., насколько текущий вариант уступает идеальному.

Среди сопоставляемых конструктивных исполнений (варианты 1 ÷ 5) оптимальным

решением при «сбалансированном подходе» к назначению коэффициентов значимости критериев является вариант 3, поз. 5.

Отметим, что при замене в агрегированной целевой функции критерия Θ_{Cu_Ch} на критерий $\Theta_{Cu_Ц}$, вариант 3 по-прежнему является оптимальным.

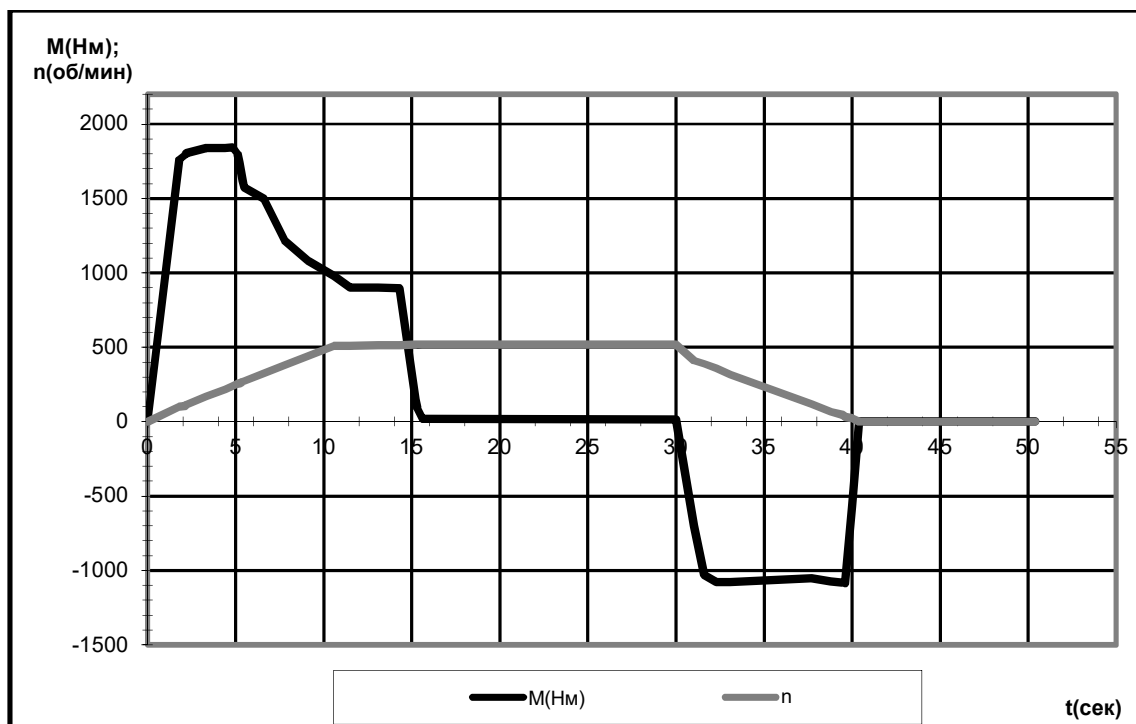


Рис. 1. Опытный график моделируемого ездового цикла для варианта двигателя 6 (для вариантов 1÷5 графики топологически подобны)

На базе варианта 3 был разработан, изготовлен и испытан троллейбусный двигатель 7AT250LB4 для второго кластера ($P_n = 180$ кВт, S2 – 1 час), отличающийся от варианта 3 тем, что клетка ротора выполнена медной сварной, вариант 6. По энергоэффективности эта машина превосходит тяговый двигатель ДТА-2У1, выпускаемый АО «ПЭМЗ», г. Псков. Обратим внимание, что все двигатели привода троллейбуса разработки ПАО «НИПТИЭМ» на сегодняшний день выполнены с мягкими секциями для всыпной обмотки. Троллейбусные двигатели АО «ПЭМЗ» выполняются с жесткими секциями.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В настоящее время двигатели вариантов 3 и 6 освоены ПАО «НИПТИЭМ» и серийно поставляются для комплектации троллейбусов. В ближайшей перспективе авторы предполагают сообщить о результатах разработки двигателя привода троллейбуса для группы 3) с циклическим режимом, эквивалентным длительной мощности $P_n = 180$ кВт (S1).

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Нормы выбросов вредных веществ автомобилями в мире. Справка. [Электронный ресурс] // Аргументы и факты. – 14.07.2017. – http://www.aif.ru/dontknows/file/normy_vybrosov_vr_vredn_veshchestv_avtomobilyami_v_mire_spravsp. Дата обращения: 14.01.2018.
2. <http://www.trolza.ru/catproduct.pl>. Дата обращения: 14.01.2018.
3. Захаров А.В., Кобелев А.С., Кудряшов С.В. Определение превышений температур и допустимых нагрузок закрытых асинхронных двигателей с короткозамкнутым ротором, эксплуатируемых в широком диапазоне частоты вращения // Электричество. – 2010. № 12. С.35–42.
4. Кобелев А.С. Выбор рационального числа полюсов тяговых асинхронных двигателей при условии постоянства температуры обмотки статора в квазиноминимальной точке тяговой характеристики // Материалы XVIII Междунар. научно-технической конференции «Состояние и перспективы развития электротехнологии». Иваново. 2015. Том 3. С. 120–124.